

Puntas o Sondas de prueba

Hemos entendido como funciona/procesa las señales el osciloscopio. La pregunta que está pendiente es: Cómo hacer que la señal que queremos medir llegue a la entrada de un osciloscopio?

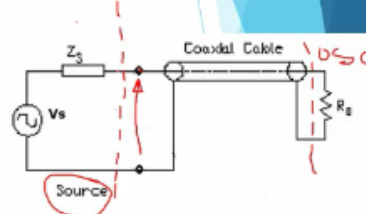
Recordemos que: Toda fuente de señal se puede representar por su equivalente de Thévenin.

Si se trata de una señal proveniente de un equipo cuya salida está pensada para conectarse en condiciones de adaptación la solución es simple:

Basta una línea (coaxial) de la impedancia característica correcta y seleccionar la entrada a baja impedancia en el osciloscopio.

En general como la entrada del osciloscopio es de 50 Ohm, la línea será de 50 también. Muchos de los equipos a ser medidos tienen salida de esa impedancia por lo que no es una gran limitación.

Si ese no fuera el caso siempre es posible usar una red adaptadora resistiva para tener una banda ancha.



Aunque esa situación es muy común en una gran cantidad de aplicaciones ...

NO resuelve todos los casos que se presentan en la práctica

Puntas o Sondas de prueba

Qué ocurre si la fuente de la señal es un nodo de un circuito cuya impedancia equivalente de Thévenin ni siquiera conocemos?

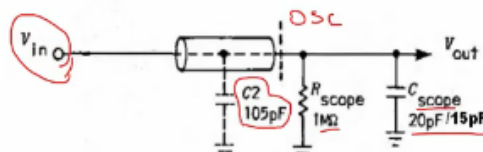
La **respuesta simple** sería cambiar la impedancia de entrada del **osciloscopio a 1Mohm** (recordemos la capacidad que tiene en paralelo) para **minimizar el efecto de carga sobre** ese nodo y usar el mismo coaxial para llegar desde el nodo al conector de entrada del osciloscopio.

Supongamos usar una línea de 1,5 m.

Hasta **frecuencias <20MHz**, cuyas longitudes de onda son mayores a 10 veces el largo de esa línea se puede **modelar a la línea como una capacidad pura ignorando la L**.

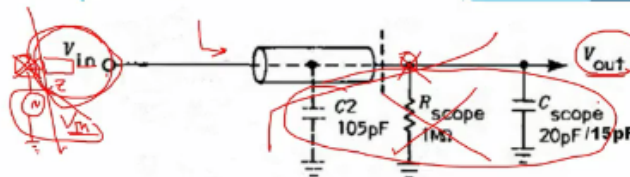
(X_L =mohms (en serie) y X_C =centenares de ohm (en paralelo))

Si revisamos las especificaciones de una línea coaxial de 50 ohm muy común (RG58) vemos que la capacidad agregada es muy significativa y bastante mayor que la propia del osciloscopio.



Puntas o Sondas de prueba

El **circuito equivalente** resultante del conjunto osciloscopio+cable es básicamente una **capacidad a masa**



Esa capacidad es "grande" para las frecuencias habituales de uso y trae dos consecuencias:

1. **Baja impedancia.** Seguramente alterará el funcionamiento del circuito cuya señal deseamos ver.
2. Por su carácter **capacitivo** forma (muy probablemente) con la impedancia equivalente del nodo un **filtro pasabajos** que, salvo para las frecuencias más bajas, impedirá que la señal llegue al osciloscopio.

Elegir coaxiales de la menor capacidad por unidad de longitud mejora la situación pero, aún así, para nodos con R_{TH} del orden de los ohms la **frecuencia de corte** está por **debajo de los 10/15 Mhz**

Todo esto hace que esta alternativa sea **útil solo en baja frecuencia**.

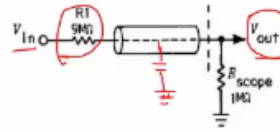
Es importante notar que, en esas bajas frecuencias en las cuales la capacidad es tolerable, la señal **NO ES ATENUADA** debido a la alta R de entrada.

Puntas o Sondas de prueba

El primero de los problemas, la **impedancia baja**, se solucionaría agregando una impedancia en serie para aumentarla.

Se prefiere agregar una resistencia de alto valor pues, en teoría, se comporta igual a todas las frecuencias.

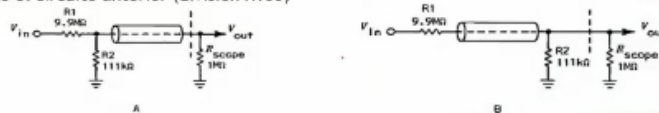
El agregado de la resistencia serie aumenta la impedancia pero inevitablemente atenuará la señal. Elegimos $R=9\text{ Mohm}$ para que la atenuación, con 1 Mohm del osciloscopio, sea X10 (=fácil escalar las lecturas)



Non encontramos aquí con un compromiso habitual en mediciones y más general de lo que parece:

“Alterar” poco lo medido implica extraer poca energía de ese circuito y, en general, disminuye la sensibilidad del equipo de medición. El agregado de un circuito activo mejora la situación pero no hace desaparecer el problema.

En algunos casos la atenuación puede ser hasta conveniente (señales grandes) y aún puede ser necesario atenuar aún más (X100 o X1000) dada la magnitud de las señales a medir. En ese caso se altera ligeramente el circuito anterior (división X100)



Puntas o Sondas de prueba

La atenuación implementada simplemente con una resistencia si bien mejora el problema del efecto de carga empeora (mucho) el efecto de filtro pasabajos.

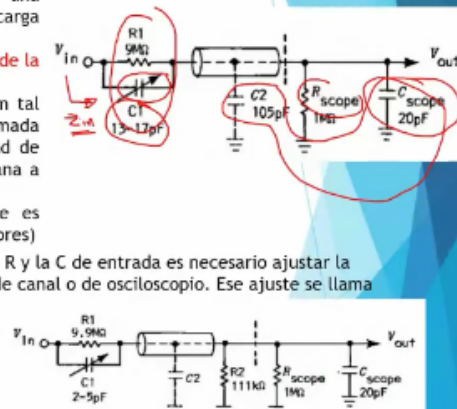
Para **resolver** esto se agrega **un cero donde está el polo de la transferencia**:

Un capacitor en paralelo con la resistencia de 9 Mohm tal que la constante de tiempo RC sea igual que la de formada por la R de entrada del osciloscopio con las capacidad de entrada+la del cable hace que la transferencia sea plana a **todas las frecuencias**.

Adicionalmente la capacidad de entrada equivalente es **menor** (Aproximadamente igual a la serie de los capacitores)

Como cada osciloscopio tiene ligeramente diferentes la R y la C de entrada es necesario ajustar la constante de tiempo cada vez que se cambia la punta de canal o de osciloscopio. Ese ajuste se llama **compensación en baja frecuencia**.

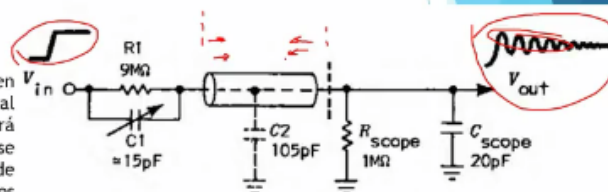
En la punta X100 la solución es similar aunque, naturalmente, con otros valores



Puntas o Sondas de prueba Efecto de la línea de transmisión

En el esquema anterior la línea de transmisión no está terminada en ninguno de los dos extremos. Tanto el osciloscopio como el otro extremo de la línea presentan impedancias R (grande) C (intermedia).

Si se está midiendo cualquier señal (en particular un pulso) cuando llega al extremo conectado al osciloscopio habrá una onda reflejada que nuevamente se reflejará en el extremo de “entrada” de la punta. Esas reflexiones múltiples “deforman” la señal observada.



Response to fast rise pulse.

Si las reflexiones múltiples se producen porque la línea no está adaptada y no tiene pérdidas.

Para evitarlas la solución es... **agregar pérdidas e intentar estar más cerca de la adaptación!**

Puntas o Sondas de prueba. Coaxial disipativo

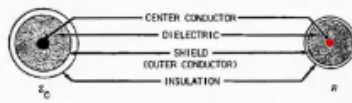



Fig. 2-6. Comparison of Z_0 and R cable.

Para agregar pérdidas se usa un vivo de muy pequeña sección y de un material mucho más resistivo que el cobre. El diámetro exterior es también menor por lo que es **más flexible** (ventaja) y **más frágil** (desventaja). Por sus dimensiones la capacidad por unidad de longitud es de **18 a 30** pF por metro (menor que un coax RG 58 de 50 ohm que tiene 70 pF/m)

De la teoría sabemos que la impedancia característica de una línea depende de las impedancias por unidad de longitud según:

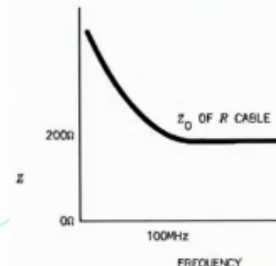


El diagrama muestra una línea de transmisión infinita representada por una línea horizontal. A lo largo de la línea, se indican los parámetros por unidad de longitud: una resistencia R en serie, una inductancia L en serie, una capacitancia C en shunt y una conductancia G en shunt.

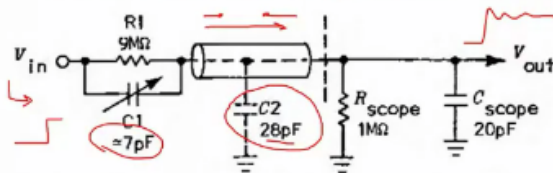
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_{\text{series}} + j \omega L}{G_{\text{shunt}} + j \omega C}}$$

(G es despreciable pero la pérdida es en el cobre no lo es por nuestra elección)

Resulta que el módulo de Z_0 a frecuencias bajas varía como “una capacidad y a frecuencias altas los términos reactivos “ganan” y el módulo tiende a un valor constante. En los coaxiales usados habitualmente para estos casos esa impedancia está en el entorno de 200 ohm



Puntas o Sondas de prueba. Coaxial disipativo

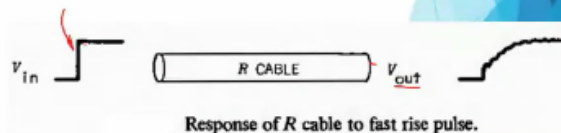


La menor capacidad por unidad de longitud del cable permite usar una capacidad de compensación menor y que la capacidad TOTAL de entrada del conjunto punta+osciloscopio disminuya.

Compensated 10X probe with 8 pF/ft *R* cable.

El uso de una línea disipativa hace que sea muy significativo un problema de todas la líneas.

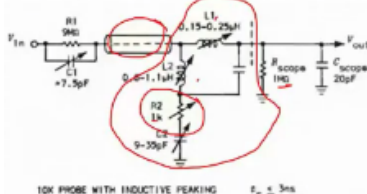
La atenuación crece con la frecuencia. Los componentes que conforman el flanco de un pulso (más alta frecuencia) son los más perjudicados resultando un empeoramiento del tiempo de crecimiento observado.



Puntas o Sondas de prueba. Compensación en alta

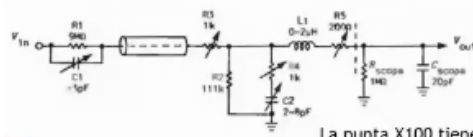
Se hace necesario el uso de un circuito adicional de énfasis en alta frecuencia.

Adicionalmente este agregado circuital permite agregar resistencias de terminación adecuadas al coaxial utilizado sin cambiar las atenuaciones.

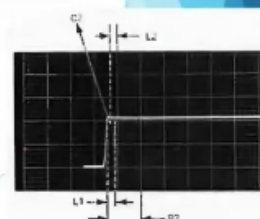


R2 funciona como una resistencia de terminación.
C2 impide que la R2 "baje" la impedancia de la punta.
L2 compensa C2 en alta frecuencia y con L1 genera el énfasis necesario
A este circuito se lo denomina de compensación en alta frecuencia.
Nótese que depende de la atenuación del cable por lo que el ajuste se hace en fábrica (aunque algunos modelos tienen un procedimiento de calibración).

“Zonas” donde impacta cada componente



La punta X100 tiene ligeras variantes



Puntas o Sondas de prueba. Compensación en alta

Por un tema de tamaño/comodidad se prefiere que el capacitor de ajuste no esté en el extremo de la punta misma por lo que se usa una ligera variante del circuito anterior.

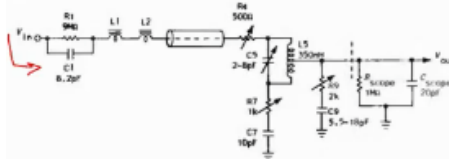
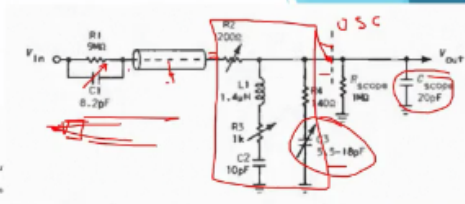
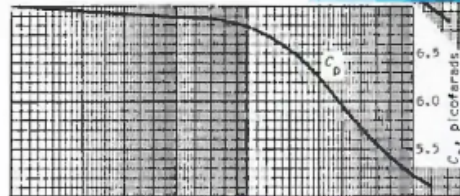


Fig. 2-17. 10X probe with T-coil type termination.

Un efecto interesante es que si bien las puntas tienen siempre una reactancia capacitiva de entrada el diseño hace que la **capacidad equivalente** sea **ligeramente decreciente a alta frecuencia**.



Esquemas más complejos se usan cuando se quiere mejorar las prestaciones en alta frecuencia (>300MHz).

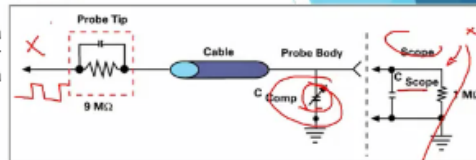


Puntas o Sondas de prueba. Compensación en baja frecuencia. Procedimiento

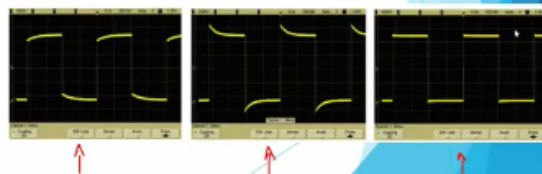
El ajuste de la compensación en baja frecuencia se realiza con la ayuda de la señal del calibrador que todo osciloscopio tiene: Una onda cuadrada de entre 1 y 100kHz



Se debe ajustar el capacitor hasta obtener la imagen más próxima a una onda cuadrada.



Se conecta la punta a la salida del calibrador y se ajusta el capacitor variable con un destornillador adecuado.



Puntas o Sondas de prueba. Especificaciones.

Las especificaciones más importantes de las puntas pasivas de tensión son:

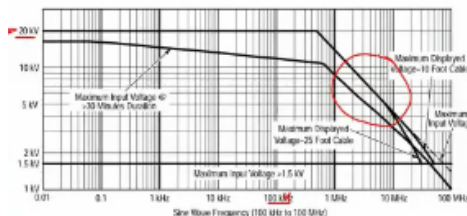
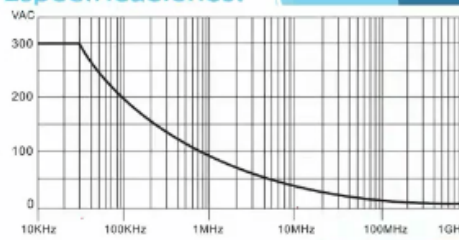
1. Atenuación
2. Resistencia de entrada
3. Capacidad de entrada
4. Impedancia de entrada
5. Tensión máxima admisible
6. Ancho de banda
7. Aberraciones

Probe	Attenuation	R	C
P6101B	1X	1 MΩ	100 pF
P6109B	10X	10 MΩ	13 pF
P6139A	10X	10 MΩ	8 pF
P6243	10X	1 MΩ	≤1 pF

Puntas o Sondas de prueba. Especificaciones. Tensión máxima admisible

La tensión máxima admisible decrece con la frecuencia.

Los capacitores que forman parte de la sonda y tienen una especificación de tensión máxima en DC. Al aumentar la frecuencia aumentan las corrientes por lo que se debe limitar la tensión a valores progresivamente menores. Obsérvese que a 300MHz una punta que en DC admite 300V está limitada a menos de 5V



Tensiones máximas en una punta de alta tensión X1000. Bajan de 20kV a solo 1,5kV a 30 MHz

Puntas o Sondas de prueba. Ancho de banda.

Se ha analizado detalladamente el ancho de banda de los osciloscopios.

Las puntas en sí mismas tienen definidos también sus anchos de banda. Es que se obtendría si se la conectara a un osciloscopio ideal (de ancho de banda infinito) y se midiera con el conjunto distintas frecuencias (crecientes) hasta tener una lectura 3dB menor a la de baja frecuencia.

En los modelos vistos hasta ahora depende fuertemente del diseño de los circuitos de compensación.

Un osciloscopio real tiene un ancho de banda finito. Cómo se comportan en conjunto?

Es posible demostrar que dos cuádrupolos colocados en cascada con una transferencia de un polo simple cada uno, mientras no estén demasiado próximos, y tendrán un RT combinado:

$$RT_{osc}^2 + RT_{punta}^2 = RT_{total}^2$$

$$\sqrt{1 + 0.25} = 1.1$$

Recordemos también que el RT (10% al 90%) de un sistema de un polo simple es:

$$RT = \frac{0.35}{BW}$$

donde BW es el ancho de banda de 3dB del cuádrupolo

De la ecuación se observa que si uno de los dos anchos de banda es entre 3 y 4 veces el otro el menor es el que define el ancho de banda total. Tradicionalmente cuando la mayoría de los osciloscopios eran de anchos de banda reducidos (<100MHz) era usual que las puntas entregadas fueran de mucho mayor ancho de banda que el del osciloscopio mismo y todo estaba gobernado por la respuesta del osciloscopio.

Puntas o Sondas de prueba. Ancho de banda.

Cuál es el efecto de ambos BW en un pulso cualquiera?

Cuando se mide un flanco en una señal con el osciloscopio es posible imaginar que el RT original de la señal es "otro" cuádrupolo en cascada y "agregarlo" a la ecuación anterior:

$$RT_{señal}^2 + RT_{osc}^2 + RT_{punta}^2 = RT_{observada}^2$$

Esta ecuación es apenas aproximada y solo debe tomarse como referencia.

El gráfico adjunto da la idea de cual es el error esperado en función de la relación entre el RT de la señal y el del conjunto osciloscopio-punta

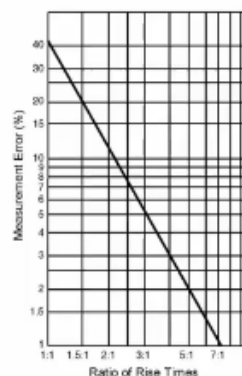


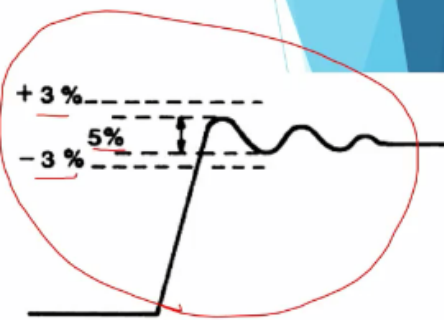
Figure 1.6. Rise time measurement error can be estimated from the above chart. An oscilloscope/probe combination with a rise time three times faster than the pulse being measured (3:1 ratio) can be expected to measure the pulse rise time to within 5%. A 5:1 ratio would result in only 2% error.

Puntas o Sondas de prueba. Aberraciones

Típicamente las puntas que hemos visto hasta ahora tienen una respuesta subamortiguada. (se las prefiere para tener el rise time lo más corto posible)

Cuando se especifica una punta se indican las aberraciones asociadas a ese comportamiento (siempre indicando el ancho de banda del osciloscopio en el cual se observaron.)

Típicamente se indican el valor porcentual máximo del sobrepico, del pico mínimo y el valor pico a pico de la oscilación.



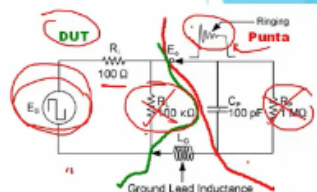
Puntas o Sondas de prueba. Efecto de la inductancia del cable de masa

En todo el análisis que hemos hecho ignoramos el efecto de la inductancia del cable de conexión a masa.

Al considerarlo el circuito equivalente de la conexión de una punta a un nodo cambia.

El ejemplo es para una punta X1.

El circuito es un **RLC serie** (R es la equivalente del nodo, L_g la inductancia del cable de masa y C_p es la capacidad de la punta).



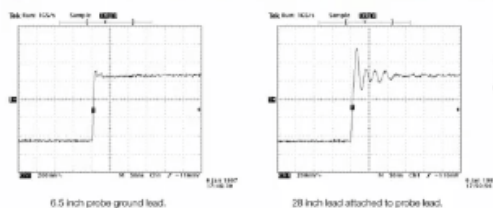
Cualquier flanco en la señal E_i producirá sobre el capacitor una transición subamortiguada.

(Lo que se ve en la pantalla es la tensión sobre el capacitor)

La frecuencia natural es

$$f_{ring} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

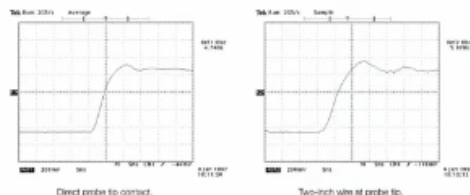
Puntas o Sondas de prueba. Efecto de la inductancia



Efectos de la inductancia para diferentes largos de cable de masa.



Accesorios:
Masa de mínima inductancia
Adaptador a conector BNC



Puntas o Sondas de prueba. Efecto de carga

No debemos olvidar que al conectar la punta a cualquier nodo la tensión en ese nodo cambia.

Para evaluar ese cambio debemos conocer la impedancia de Thévenin del nodo y compararla con la que presenta la punta.

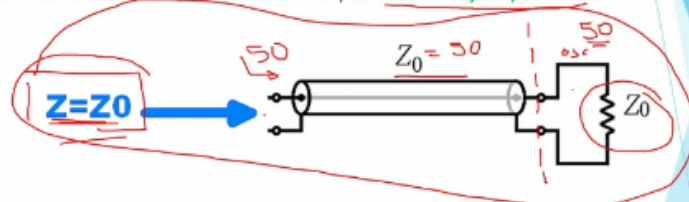
En DC todas las puntas que hemos visto presentan efectos de carga pequeños pero, a frecuencias crecientes la capacidad propia de las puntas hace que este efecto aumente.

Frec (MHz)	Tektronix TDS 2024B C = 20 pF / BW = 200 MHz		Tektronix TDS3000 Family C = 13 pF	
	Xc (Ω)	Z (Ω)	Xc (Ω)	Z (Ω)
0.01	795775	443137	1224269	550414
0.1	79577	79712	122427	109073
0.2	39789	38266	61213	57682
0.5	15915	15668	24485	23900
1	7958	7895	12243	12095
2	3979	3963	6171	6084
5	1592	1589	2449	2443
10	796	795	1224	1223
20	398	398	612	612
50	159	159	295	245
100	80	80	122	122
200	40	40	61	61
300			41	41
500			24	24

Puntas pasivas de baja impedancia

Las puntas X10 que hemos visto tienen capacidades de entrada de 8/10 pF como mínimo.

Si ese valor es excesivo una alternativa es la punta X10 de baja impedancia.



Conectar una línea de transmisión de bajas pérdidas a la entrada de baja impedancia (50ohm) del osciloscopio nos permite "trasladar" imaginariamente esa entrada al otro extremo de la línea y podría conectarse allí el nodo a medir.

Para no conectar una impedancia tan baja se usará la misma estrategia que en la punta de alta impedancia:

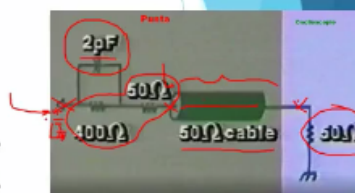
Puntas pasivas de baja impedancia

La resistencia agregada es de 450ohm para que el divisor resistivo sea X10.

La impedancia de entrada es resistiva pura y de 500ohm pues es la suma de las dos resistencias.

A diferencia del caso de alta impedancia la línea no se comporta como un capacitor y no es necesaria compensación alguna.

El capacitor agregado puentea una fracción de la resistencia que forma el divisor resistivo y permite enfatizar las altas frecuencias. Compensa la atenuación en alta frecuencia que la línea, aunque de bajas pérdidas, tiene.



La capacidad total de entrada de la punta es muy pequeña (menor a 1 pF) solo formada por los parásitos del extremo de la punta contra masa.

Este tipo de puntas tiene menor capacidad, mayor ancho de banda (típicamente hasta 1 GHz*) pero debemos ser cuidadosos con el efecto de carga en DC puesto que la impedancia de entrada es pequeña.

Impedancia de Puntas pasivas de tensión

Nótese que la magnitud de la impedancia de las puntas de "alta" impedancia es mayor que la de baja impedancia hasta alrededor de 100MHz. A frecuencias más altas la punta de "baja" impedancia tiene MÁS IMPEDANCIA que las de alta.

